

郎元强,胡大千,刘 畅等.南海北部陆区岩石磁化率的矿物学研究.地球物理学报,2011,54(2):573~587,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.037

Lang Y Q, Hu D Q, Liu C, et al. Mineralogy study of magnetic susceptibility of rocks along the coast of the northern South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(2):573~587,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.037

南海北部陆区岩石磁化率的矿物学研究

郎元强¹,胡大千^{1*},刘 畅²,张 斌^{1,3},鲁宝亮¹,王璞珺¹

1 吉林大学地球科学学院,长春 130061

2 北京林业大学生物科学与技术学院,北京 100083

3 辽河油田勘探开发研究院,盘锦 124010

摘 要 基于 2517 套现场测量资料,245 块岩石样品的体积磁化率测量和详细的岩矿鉴定及硅酸盐全分析结果,结合单矿物磁化率特征及各岩石之间的对比研究,发现岩石磁化率主要受组成岩石的矿物磁化率控制。即岩石磁化率(κ_r)与组成岩石各个矿物磁化率(κ_i)及其体积含量(C_i)成正比。例如侵入岩磁化率, $\kappa_r = -5.68 \times 10^2 C_q + 2.86 \times 10^2 C_f + 3.28 \times 10^2 C_a + 1.18 \times 10^4 C_b + 1.27 \times 10^4 C_{am} + 5.35 \times 10^5 C_m$;其中多项式各项的系数是与该矿物磁化率值成正比的常数, C 为该矿物在该岩石中的体积含量,依次为石英 $q(\kappa = -1.3)$ 、斜长石 $f(\kappa = 0.01)$ 、碱性长石 $a(\kappa = 0.01)$ 、黑云母 $b(\kappa = 100)$ 、角闪石 $am(\kappa = 80)$ 和磁铁矿 $m(\kappa = 100000)$ 。对区内火山岩、侵入岩、沉积岩和变质岩磁化率研究发现,其他三类岩石磁化率与其组成矿物磁化率的关系和侵入岩的情况相同,矿物对岩石磁化率的贡献顺序为铁磁性矿物>顺磁性矿物>逆磁性矿物。其中,火成岩磁化率变化大,主要取决于岩石中磁铁矿、角闪石和黑云母的含量;沉积岩多为无磁性、弱磁性,其磁化率主要由黑云母、碱性长石及岩屑提供;变质岩的磁性变化较大,从无磁性到极强磁性,主要决定于其原岩的类型,副变质岩(沉积原岩)磁化率类似于沉积岩类,正变质岩(火成原岩)类似于火成岩类;石英岩和碳酸盐岩是所有岩石中磁性最弱的。岩石蚀变会对其磁化率产生显著性影响,通常,黑云母、角闪石等铁镁硅酸盐矿物经蚀变会因形成含铁质氧化物而使岩石的磁化率升高;长石等弱顺磁矿物的粘土矿化、绢云母化会升高磁化率而碳酸盐化、高岭土化作用会使磁化率降低;岩石的绿泥石化会增加磁化率;含铁磁性矿物的岩石风化时会因高磁性组分破碎、流失而致使岩石的磁化率降低。从岩石磁化率与其组成矿物的磁化率之间的关系,推测地质体的总磁化率与构成地质体各个岩石的磁化率-体积含量之间也应存在类似关系。

关键词 南海北部陆区,岩石磁化率,矿物磁化率

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.02.037

中图分类号 P631

收稿日期 2010-07-17,2011-01-08 收修定稿

Mineralogy study of magnetic susceptibility of rocks along the coast of the northern South China Sea

LANG Yuan-Qiang¹, HU Da-Qian^{1*}, LIU Chang², ZHANG Bin^{1,3}, LU Bao-Liang¹, WANG Pu-Jun¹

1 College of Earth Science, Jilin University, Changchun 130061, China

2 College of Biological Science & Biotechnology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Institute of Exploration and Development of Liaohe Oilfield Company Ltd., Panjin 124010, China

Abstract On the basis of 2517 series of field measured data, bulk magnetic susceptibility values of 245 rock samples, detailed rock-mineral identification and total silicate analysis, combining with single mineral magnetic susceptibility and comparison research of each rock, we found that

基金项目 国家科技重大专项(2008ZX05025)和国家“973”项目(2009CB219303)联合资助。获“东北亚生物演化与环境教育部重点实验室”、吉林大学“211”工程三期建设项目和 2009 年教育部基本科研业务费(“吉林大学创新团队发展计划”)支持。

作者简介 郎元强,男,1986 年生,硕士研究生,矿产普查与勘探专业。E-mail:langyq09@mails.jlu.edu.cn

* **通讯作者** 胡大千,男,1955 年生,教授,博士,主要从事矿物学研究。E-mail:hudaqian2510@sina.com

rock magnetic susceptibility mainly depends on mineral magnetic susceptibility. That is, rock magnetic susceptibility (κ_r) is proportional to the product of every mineral magnetic susceptibility (κ_i) of rocks and their volume content (C_i). For example, for intrusive rocks, $\kappa_r = -5.68 \times 10^2 C_q + 2.86 \times 10^2 C_f + 3.28 \times 10^2 C_a + 1.18 \times 10^4 C_b + 1.27 \times 10^4 C_{am} + 5.35 \times 10^5 C_m$, where the polynomial coefficients are constants positively proportional to the susceptibility of magnetic minerals, C stands for the volume content of minerals, in the order of quartz q ($\kappa = -1.3$) ($4\pi \times 10^{-6}$ SI units), plagioclase f ($\kappa = 0.01$), alkali feldspar a ($\kappa = 0.01$), biotite b ($\kappa = 100$), amphibole am ($\kappa = 80$) and magnetite m ($\kappa = 100000$). On the other hand, from the magnetic susceptibility study of volcanic rocks, intrusive rocks, sedimentary rocks and metamorphic rocks, it is found that for the other three types of rocks the relationship of rock magnetic susceptibility with the magnetic susceptibility of mineral composition is similar to that of intrusive rocks. The contribution of mineral to rock magnetic susceptibility has the sequence of ferromagnetic minerals > paramagnetic minerals > diamagnetic minerals. Due to the change of volume content of magnetite, amphibole and biotite, the magnetic susceptibility of igneous rocks is extremely variable. While sedimentary rocks are mostly non-magnetic and weakly magnetic, and their magnetic susceptibility mainly origins from biotite, alkali feldspar and cuttings. Magnetic susceptibility of metamorphic rocks is also variable. It may range from non-magnetic to very strongly magnetic, this is mainly determined by the type of original rock. Susceptibility of para-metamorphic rocks (sedimentary protolith) is similar to sedimentary rocks, while orthometamorphites (igneous protolith) is similar to igneous rocks; Quartzite and carbonate rocks are the weakest of all the rocks magnetically. Furthermore, alteration of rock will have significant influence on magnetic susceptibility. Generally speaking, the following alteration of minerals can increase rock magnetic susceptibility: alteration of iron-magnetism silicate minerals such as biotite and amphibole which may form iron oxide, the sericitization or clayzation of weak paramagnetic minerals such as feldspar, and chloritization of rocks. While carbonation and kaolinization of weak paramagnetic minerals can reduce rock magnetic susceptibility, weathering of rocks can also reduce rock magnetic susceptibility by breaking and loss of high magnetic components of rocks. From the relationship between rock magnetic susceptibility and its mineral magnetic susceptibility, we infer that the total magnetic susceptibility of a geological body and the magnetic susceptibility-volume content of constitutive rocks have a similar relation to that of rock and its minerals.

Keywords Coast of northern South China Sea, Rock magnetic susceptibility, Mineral magnetic susceptibility

1 引言

岩石磁化率是表征岩石受磁化难易程度的物理量,其相关研究始于 20 世纪上半叶^[1],早期主要用于研究沉积物与沉积岩.岩石磁化率含有丰富的地质和地球物理信息,其来源是岩石磁学研究的基础^[2].通常认为,岩石的磁化率主要受岩石中磁性矿物的种类、粒度、化学成分、含量、氧化物状态以及所处的温度、压力等条件的影响^[3~5].

南海是我国最大的边缘海,有着特殊的构造背景、多彩的地质现象及丰富的油气资源,是历来中外地质学家-地球物理学家关注的焦点.多年来,针对南海及其北部地区的重磁场特征研究取得了大量的成果^[6~9],这些成果是有关南海形成演化、陆缘性质、前新生界基底结构等研究的重要资料.近年来,随着南海北部油气资源的不断开发和勘探程度的加深,对盆地前新生界基底特征及油气前景的研究逐渐成为热点.很多学者利用区域重磁场特征结合陆缘区和钻井揭示的岩石的物理性质,反演盆地前新

生界基底特征. 如郝天珧(2008)^[10]用区域重力数据结合两条地震剖面, 在相关露头区岩石密度测量基础上, 建立了南海东北部地区两条剖面的密度模型; 郝天珧(2009)^[11]利用南海最新的磁力资料, 在岩石磁化率和剩余磁化强度分析的基础上, 反演了全南海海域磁性基底的宏观分布; 陈洁(2010)^[12]汇集了南海历年的磁力实测资料, 重新进行了相关处理, 结合南海相关露头区和钻井岩石的磁性资料, 建立了认识、解释南海的磁场基础体系等等. 这些研究推动了对南海盆地基底结构的认识. 岩石物性是重磁反演的基础, 李唐根(1987)^[13]报道了雷琼和茂名地区盆地钻井岩心和露头剖面各类岩石密度和磁化率测定的统计数据. 姜枚和贾秀敏(1989)^[14]报道了江西和福建地区花岗岩质岩石密度和磁化率的研究结果. 金庆焕(1989)^[15]总结了南海海区及周缘岩石的磁性特征. 本文重点探讨岩石磁化率与构成岩石各种矿物磁化率及其体积含量之间的量化关系, 进而揭示本区主要岩石类型的磁化率特征与成因. 另外, 区域磁异常实质上是由构成地质体的各类岩石(磁性体)综合作用的结果. 本项研究还希望通过岩石与矿物磁化率的关系, 探索地质体与岩石单元(单一岩性体)磁化率的关系.

2 样品采集与分析测试

基于海陆对比和区域构造研究¹⁾, 确定与南海盆地基底相关的露头剖面进行本文的岩石磁化率研究(图 1). 岩石磁化率的野外露头测量使用 SM30 便携式磁化率仪(捷克产, 灵敏度可达 10^{-7} SI). 测量方法是: 在一个平整且新鲜的岩石面上选择 10 个不同的点, 每个点测量数次, 对 3 次测量误差小于 1% 的数据取算术平均值作为该点的磁化率野外测量值. 这样, 在盆缘剖面上测量了几乎所有的海域盆地基底可能出现的岩性, 测量数据点 2517 套(图 2a). 经野外岩石磁化率测量后, 对于磁化率有显著性差异的同种和不同种岩石进行系统采样(同种岩石, 如花岗岩, 在露头剖面上可显示差别很大的磁化率, 对此要分别采样). 采样遵循以下原则: ①能代表海域盆地基底已经出现和可能出现的所有岩性; ②岩石新鲜或较新鲜, 保证能制成薄片并满足室内测

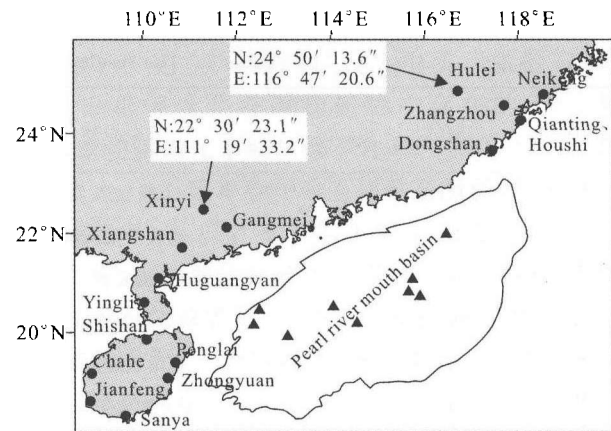


图 1 陆地采样位置(黑色圆点)与海域盆地内有磁化率测试的井位(黑色三角形)

Fig. 1 Location map showing rock samples along the coast of the northern South China Sea (black points) and drilling wells that have magnetic susceptibility measurement in the basin of sea area (black triangles)

量制样要求; ③不同岩石类型分别采样; ④同种岩性野外磁化率测量值差别大于 100×10^{-6} SI 或相对变化率大于 100% 者均进行分别采集. 据此, 采集了火山岩、岩浆岩、沉积岩、变质岩四大类岩石样品共 245 块. 室内磁化率和密度测量在吉林大学古地磁实验室完成. 方法如下: 用岩石切割机将样品加工为 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 的规则立方体, 用国产卡帕桥 HKB-1 型磁化率测试仪, 仪器灵敏度 5×10^{-8} SI, 采用 X、Y、Z 三方位平均测定体积磁化率(体积磁化率(κ)是无量纲的, 它是物质单位体积的感应磁化强度 J 和外部磁场强度 H 的比值, 用公式表示是: $J = \kappa H$). 测试结果见表 1 和图 2b.

将样品制成薄片, 利用偏光显微镜进行岩矿鉴定, 重点研究岩石中矿物组成、粒度大小、分布状况(结构)、含量及经历的次生变化等, 在岩石准确定名基础上准确统计所有组成矿物的体积含量. 另外, 选取部分火山岩样品进行硅酸盐全分析(化学法, 吉林大学分析测试中心), 用以计算 CIPW 矿物含量, 并与镜下统计的矿物含量相互校正.

3 单矿物磁化率特征

岩石是由矿物组成的, 不同矿物的磁化率大小不同, 对岩石磁化率的贡献就不同. 岩石内部包含的磁性物质的多少以及磁性物质本身的磁化率大小就决定了整块岩石的磁化率大小^[16]. 铁磁性、顺磁性和逆磁性矿物都提供着低场强磁化率^[17]. Ali Aydin 等(2007)^[18]在研究花岗岩磁化率时指出, 岩石磁化

1) 王璞珺, 孙晓猛, 唐华凤等. 南海北部深水区及其邻区基底构造与火山作用研究. 国家科技重大专项子课题研究报告, 2010

表 1 研究区岩石磁化率测量结果统计表
Table 1 The results of measured rock magnetic susceptibility

岩性	时代	岩石名称	磁化率($4\pi \times 10^{-6}$ SI)		采样地点	样品个数
			变化范围	平均值		
火山岩	Jf, K _{sy}	流纹岩	2357~5153	3471	湖雷、祥山	6
	K _{sy}	流纹质凝灰岩	1247~2357	1802	祥山	2
	Jf	英安岩	41~125	83	湖雷	2
	Pt _l , Jf	安山岩	548~1136	693	信宜、湖雷	5
	Jf	安山质凝灰岩	569	569	湖雷	1
	Jf	玄武岩	33180~69867	51524	湖雷	2
	Jf, Nf, Nsm, Nsg, Qh, Qs, Qpd, Qsh	橄榄玄武岩	1110~50207	5874	湖雷、后石、前亭、蓬莱、湖光岩、英利、海口、道堂	56
	T ₃ l, Jf, Qh	玄武质凝灰岩	306~4943	2158	中原、湖雷、湖光岩	8
	Nsg	粒玄武岩	3775~72883	21318	蓬莱	4
侵入岩	T, J, K	石英二长岩、富石英花岗岩、花岗斑岩、正长花岗岩、黑云母花岗岩、黑云母二长岩	10~32917	1827	尖峰、东山、中原、漳州	41
	J-K	闪长岩、含磁铁矿闪长岩	4790~105467	30708	岗美、东山、漳州	8
	Mz	硅质岩脉、花岗伟晶岩脉	-15~-7	-12	东山、叉河、前亭	6
	Mz	含磁铁矿英岩	2648	2648	东山	1
	Mz	中基性岩脉	14037~41200	28010	前亭、后石、东山、尖峰、三亚	15
Mz	强蚀变辉绿岩	5916	5916	后石	1	
沉积岩	∈ ₁ m, O ₂ j, K ₁ l, T ₃ l	泥岩、粉砂质泥岩、粉砂岩	25~305	82	三亚、中原	13
	∈ ₁ m, O ₂ j, K ₁ l, T ₃ l	岩屑长石砂岩、含黑云母长石砂岩	172~512	372	三亚、中原	4
	O ₂ y	复成分砾岩	66~201	131	三亚、海口	3
	∈ ₁ m	灰岩	-15~-8	-10	三亚	3
变质岩	∈ ₁ m, Pt _l , T ₃ l	浅变质含黑云母长石细砂岩	163~423	249	三亚、信宜、中原	4
	∈ ₁ m, Pt _l , O ₂ y	变质细砂岩、变质石英砂岩	25~52	46	信宜、三亚	8
	Pt _l , ∈ ₁ m	千枚岩	50~281	103	信宜、三亚	6
	Pt ₂ , AnDq	含石榴石/白云母片岩	12~700	162	叉河、东山	16
	Pt _l , AnDq	(含石榴石)石英片岩	39~93	61	信宜、东山	3
	AnDq	含磁铁矿石英片岩	8255	8255	东山	1
	AnDy	黑云角闪片岩	2617~19487	11052	后石	2
	Pt _l , Pt ₂ , AnDq	白云母斜长片麻岩	39~292	119	信宜、叉河、东山	16
AnDq, AnDy	黑云母长石片麻岩/花岗片麻岩	181~13681	3600	后石、东山、内坑	8	

注: Pt₂-中元古界抱板群; Pt_l-前震旦系罗罅组; ∈₁m-下寒武统孟月岭组; O₂y-中奥陶统榆红组; O₂j-中奥陶统尖峰组; AnDy-前泥盆系岩雅组; AnDq-前泥盆系亲营山组; Mz-中生界; T-三叠系; T₃l-下三叠统岭文组; J-侏罗系; Jf-侏罗系藩坑组; K-白垩系; K_{sy}-白垩系三丫江组; K₁l-下白垩统鹿母湾组; Nf-新近系佛昙组; Nsm, Nsg-新近系石马村组、石门沟村组; Qh-第四系湖光岩组; Qs-第四系石岭岭组; Qpd-第四系道堂组; Qsh-第四系石山组。

率与各种矿物磁化率之间存在线性加和关系。除岩石磁化率外,很多学者对单矿物的磁化率进行了测定和研究^[19~25],积累了宝贵的单矿物磁化率资料。

本文在这些单矿物磁化率研究数据的基础上进行本区岩石磁化率的矿物学研究。

单矿物的磁性特征通常按其磁化率大小分为逆

磁性或抗磁性矿物(diamagnetic mineral,磁化率 $\kappa < 0$)、顺磁性矿物(paramagnetic mineral, $\kappa > 0$)和铁磁性矿物(ferromagnetic mineral, $\kappa \gg 0$)三大类^[26]。表 2 为常见矿物的磁化率值、产状及引起磁化率升降变化的常见矿物蚀变特征。

逆磁性矿物磁化率很小,几乎都是负值,自然界中多数无铁造岩矿物都是逆磁性的^[19]。这类矿物的磁化率与磁场强弱及温度高低无关^[20]。除表中所列者外,常见的逆磁性矿物还有方铅矿、闪锌矿、锡石、重晶石、天青石等。但值得注意的是,矿物中的杂质或包裹体对其磁性会产生显著性影响。例如,由于石英中常含有顺磁性或磁铁矿等固体包裹体,使其磁性呈现出弱顺磁性或强顺磁性^[27]。

顺磁性矿物磁化率值也很小,其化学成分一般是含铁硅酸盐和铝硅酸盐^[28]。这类矿物的磁化率值一般小于 $500(4\pi \times 10^{-6} \text{ SI})$,变化范围在 $0 \sim 5000$

($4\pi \times 10^{-6} \text{ SI}$)之间。磁化率大小主要与矿物中的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 有关^[22]。例如,表 2 中所示橄榄石、辉石、黑云母等含铁硅酸盐矿物中存在的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} ,就使得磁化率较其他不含 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的矿物磁化率大。有时因矿物中含有磁铁矿微粒,会出现较高的磁化率^[19],或者矿物发生次生变化,析出铁质或磁铁矿,也会使得矿物的磁化率升高。例如,橄榄石的蛇纹石化及黑云母、角闪石的绿泥石化都会生成磁铁矿^[29,30]。一般情况下,温度越高,顺磁性矿物的磁化率就越小^[19]。

自然界中的铁磁性物质不多,分布最广的铁磁性矿物是铁的氧化物、氢氧化物、硫化物等^[31],主要的铁磁性矿物及其磁化率值列于表 2 中。铁磁性矿物在岩石中的含量较少,变化范围一般由 $< 0.01\%$ 至 $7 \sim 10\%$ ^[32],但铁磁性矿物的磁化率值远大于顺磁性矿物和逆磁性矿物的磁化率值。因此,即使岩石

表 2 单矿物磁化率、产状及引起磁化率变化的常见蚀变特征统计表
Table 2 Magnetic susceptibility, occurrence and alteration of selected minerals

磁性	矿物	化学式	体积磁化率		产状及引起磁化率改变的常见变化特征*
			$4\pi \times 10^{-6} \text{ SI}$	资料来源文献	
逆 磁 性 矿 物	石英	SiO_2	$-1.3 \sim 1.7$	[1,19,20,22,23,24]	不易风化,广泛分布于三大岩类中。常含阳起石、砂线石、磷灰石、锆石、磁铁矿等包裹体,使其磁化率变化
	正长石	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	$-1.3 \sim 1.7$	[19,20,22,23,24]	主要产于酸性和碱性火成岩中,片麻岩、长石砂岩中也常见。其表面常有分解物,当分解物中含氧化铁时,磁化率升高;常蚀变为高岭石,可被白云母和石英代替
	方解石	CaCO_3	$-1.2 \sim 3.9$	[1,19,20,22,23,24]	为钙质岩石的主要矿物,广泛分布于沉积岩和变质岩中,经常含 Fe、Mn 等,使其磁化率升高
	锆石	$\text{Zr}[\text{SiO}_4]$	-1	[22,24]	不易风化蚀变和破碎,三大岩类中均以副矿物出现,含量较少
	磷灰石	$\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3(\text{OH}, \text{F})$	-1.1	[20,22,23,24]	分布较广,在三大岩类中均有产出。在碱性岩及超镁铁质-镁铁质岩中可大量出现。常作副矿物产出,一般不易变化
	高岭土	$\text{Al}[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$	$-0.5 \sim -0.4$	[23]	长石、似长石等分解的产物,广泛分布于火成岩、变质岩的风化壳中,常含 Fe^{3+} 等
弱 顺 磁 性 矿 物	微斜长石	$\text{K}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$	< 0.01	[20,22]	主要见于花岗岩、花岗伟晶岩、正长岩及片麻岩、片岩中
	斜长石	$\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8] - \text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8]$	< 0.01	[20,22]	广泛分布于三大岩类中,经常变为绢云母和粘土矿物,表面混浊,多呈土灰色或褐灰色,一般碱性斜长石比酸性斜长石更易变化
	白云母	$\text{K}(\text{Al}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2)$	$4 \sim 20$	[20,22,23,24]	广泛分布于变质岩石中,偏酸性的火成岩中亦可见,较稳定,常含有铁镁等杂质,使其磁化率升高
	砂线石	$\text{Al}[\text{AlSiO}_5]$	3	[20,22]	产于接触变质岩中,常蚀变为绢云母及粘土矿等
	绿帘石	$\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}\text{Al}_2[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4]\text{O}(\text{OH})$	$2 \sim 100$	[22,24]	广泛分布于变质岩中,是辉石、角闪石、斜长石、黑云母等的次生蚀变矿物之一
	红柱石	$\text{AlAl}[\text{SiO}_4]\text{O}$	7	[20]	广泛分布于热接触变质的角岩中,在低压区域变质岩、变质石英砂岩、次生石英岩中也常见
	蒙脱石	$\text{N}_{\text{ax}}(\text{H}_2\text{O})_4\{(\text{Al}_{2-x}\text{Mg}_x)[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2\}$	$33 \sim 35$	[22]	主要产于火山灰及凝灰岩分解而成的斑脱岩中
	伊利石	$\text{K}_{1-x}(\text{H}_2\text{O})_x\{\text{Al}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_{2-x}(\text{H}_2\text{O})_x\}$	41	[22]	主要是沉积生成物和极低级变质作用产物,也可以是长石、云母、似长石等的热液蚀变或风化产物
	蓝晶石	$\text{Al}[\text{SiO}_4]\text{O}$	40	[30]	主要产于高压变质岩中,常转变为绢云母、白云母、叶腊石。在自然条件下较稳定

续表 2

磁性	矿物	化学式	体积磁化率		产状及引起磁化率改变的常见变化特征*
			$4\pi \times 10^{-6}$ SI	资料来源文献	
	黑云母	$K\{(Mg_{<2/3}, Fe_{>1/3})_3 [AlSi_3O_{10}](OH)_2\}$	15~290	[19,20,22,23,24]	最常见的造岩矿物之一,广泛分布于三大岩类中.黑云母中 Ti、Fe ³⁺ 及 Fe ²⁺ 的含量变化引起了黑云母磁化率的变化.含 Ti 高时,黑云母红褐色或红棕色;含 Fe ³⁺ 较多时,呈绿色;含 Fe ²⁺ 多而 Fe ³⁺ 、Ti 少时,多呈黄褐色或暗褐色.最常转变为绿泥石,含 Ti 的黑云母常分解形成针状金红石、细粒的钛铁矿、磁铁矿和榍石等矿物.有时转变为白云母,析出细小的铁质矿物,这些变化使得黑云母的磁化率有较大差异
	铁黑云母		750	[20]	只产于碱性岩中,具有很深的颜色和黄绿色多色性,不易变化
	角闪石	$Ca_2(Mg, Fe^{2+})_4Al [SiAlO_{22}](OH)_2$	10~130	[19,20,24]	是火成岩和变质岩的最主要造岩矿物之一.成分较为复杂,当绿色角闪石中的 Fe ²⁺ 被氧化为 Fe ³⁺ 时呈褐色.易变为绿泥石、绿帘石、黑云母、碳酸盐矿物、绢云母、石英和磁铁矿等,使岩石磁化率升高
强顺磁性矿物	橄榄石	$(Fe, Mg)_2SiO_4$	2~160	[19,24]	主要产于 SiO ₂ 不饱和的镁铁-超镁铁质岩中,不和石英同时出现.易蚀变为蛇纹石,并伴随析出磁铁矿,还可变为伊丁石、皂石,磁铁矿的析出使磁化率值大幅升高
	辉石	$(Ca, Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Al, Ti)_2[Si, Al)_2O_6]$	40~467	[19,20,23,24]	是火成岩中最常见的暗色矿物之一,主要产于镁铁质和超镁铁质的岩石中,在某些中性岩及酸性岩中也时有产出.以普通辉石为例:富铁(呈绿色)和钛(呈紫褐色、紫色)的变种具有微弱多色性.易蚀变为绿泥石,有时可转变为黑云母、绿帘石、方解石、蛇纹石、绿鳞石等
	石榴石	$A_3B_2[SiO_4]_3$	50~270	[20,22,23,24]	钙铝和钙铁石榴石大多分布于夕卡岩和结晶灰岩中;铝质石榴石分布于结晶片岩、片麻岩等,也产于伟晶岩和火成岩中,不易变化
	金云母	$K\{(Mg_{>2/3}, Fe_{<1/3})_3[AlSi_3O_{10}](OH, F)_2\}$	50~75	[19,20,24]	多产于镁质大理岩中,常与橄榄石、蛇纹石产于富镁的金伯利岩、橄榄岩、白榴玄武岩及某些辉长岩中,可蚀变为绿泥石,使其磁化率升高
	十字石	$(Fe^{2+}, Mg)_2(Al, Fe^{3+})_3O_5[SiO_4]_4(O, OH)$	52	[20]	是典型的变质矿物,常变为绿泥石、绢云母及铁矿物
	绿泥石	$Ca_2(Mg, Fe^{2+})_4Al[Si_7AlO_{22}](OH)_2$	20~90	[19,20]	在自然界中分布很广.火成岩中石辉石、角闪石、黑云母等的蚀变矿物,不易变化
	黄铁矿	FeS_2	35~500	[20,22,23,24]	常见于强烈蚀变的的中酸性火成岩和金属硫化物热液矿脉中,易氧化,边部常被红褐色的含水氧化铁所包围
	磁铁矿	Fe_3O_4	100000~570000	[19,20,22,23]	晶形为八面体或菱形十二面体.通常呈不规则粒状,致密块状.一些镁铁质硅酸盐矿物如橄榄石、黑云母、角闪石等蚀变过程中常伴有磁铁矿的析出.磁铁矿在岩石中分布最广泛.在三大岩类中均为常见矿物之一,磁铁矿中常含有钛铁矿的成分,称为钛磁铁矿
铁磁性矿物	钛磁铁矿	$xFe_3O_4 \sim (1-x)TiFe_3O_4$	13000~62000	[19,20,22,23]	—
	磁赤铁矿	$\gamma-Fe_2O_3$	20000~25000	[1,19,20,22,23]	具尖晶石型结构的的赤铁矿
	赤铁矿	$\alpha-Fe_2O_3$	50~4000	[20,23]	通常为粒状,鳞片状或致密块状,薄片上可呈六边形,透明红色或橙红色,有微弱多色性.常以细尘状混入的形式包裹在长石(正长石)以及白云母或石英、辉石等矿物中,并将长石染红.在三大岩类中均可出现
	针铁矿	$\alpha-FeOOH$	110~1200	[20,23]	主要产于沉积岩中

* :据文献[28,31]整理.

中只含有少量的铁磁性矿物,也是岩石磁化率的主要贡献者.对铁磁物质来讲,在弱磁场中当温度升高

时,其磁化率随温度渐渐增大;接近居里点时,磁化率值很快达到极大值;到达或超过居里点时,磁化率

急剧减小而趋于零,变为顺磁性^[4].

4 研究区岩石磁化率与矿物组成综合研究

4.1 研究区岩石磁性分级

由磁化率的计算公式($J = \kappa H$)可知,磁化率是岩石感应磁化强度(J)强弱的直接反映. 因此根据岩石磁化率大小划分的岩石磁性强弱,可以直接用以衡量岩石的感应磁化强度大小.

由于研究目的不同以及岩石磁化率本身的复杂性,岩石磁性强弱的分级就难以形成一个统一的量化标准. 针对不同的研究对象和研究目的,有不同的划分标准. 本文所测得的岩石磁化率变化范围较大($(-15 \sim 105467) \times 4\pi \times 10^{-6}$ SI)(图2),由室内测量结果做出的岩石频率分布直方图(图2b)可以看出,岩石磁化率主要集中于 $10 \sim 100(4\pi \times 10^{-6}$ SI)和 $1000 \sim 10000(4\pi \times 10^{-6}$ SI)两个区间,呈现双峰式分布特点. 野外大样本的测量结果显示 $1000 \sim$

$10000(4\pi \times 10^{-6}$ SI)之间集中了大量的岩石(图2a),磁化率分布呈偏正态分布. 为便于研究及资料处理,根据趋势线的变化情况,综合野外磁化率测量结果及室内磁化率结果,将岩石划分6个磁性级别(表3),分界点示于图2(黑色圆点). 该磁性级别划分的主要目的首先是区分不同类型的岩石,然后再将类型相同但磁化率不同的岩石分成不同的亚类(如花岗岩类,按磁性矿物组成的差异划分亚类).

4.2 研究区各磁性岩石矿物成分特征

表4给出了研究区各磁性岩石的矿物成分统计结果. 逆磁性岩石主要包括石英岩、硅质岩和碳酸盐岩,磁化率范围从 $-15 \sim -7(4\pi \times 10^{-6}$ SI). 岩石矿物成分单一(图3k),主要由石英或方解石组成,不含其他矿物;其次,岩石新鲜,矿物没有遭受蚀变.

无磁性岩石磁化率在 $10 \sim 93(4\pi \times 10^{-6}$ SI)之间,岩石类型主要为泥岩、粉砂岩、细砂岩及二长花岗岩、富石英花岗岩、白云母片岩等. 其主要矿物成分为碱性长石、斜长石、石英、白云母(图3g),且这些逆磁、弱顺磁性矿物的体积占岩石总体积的95%

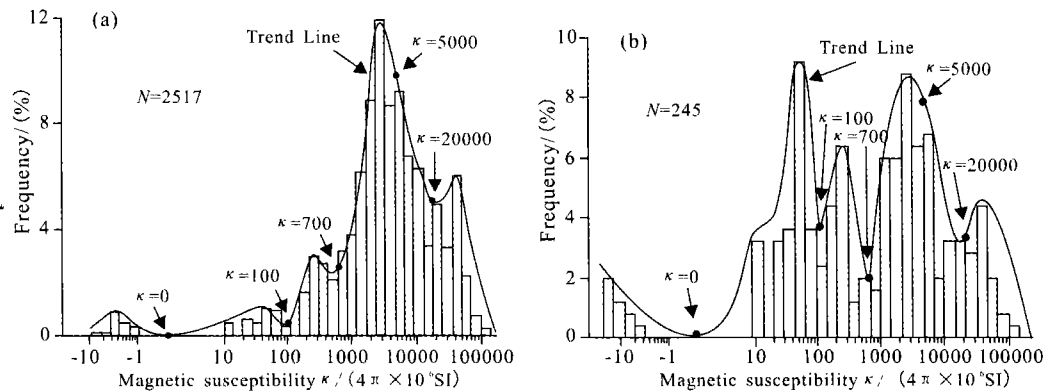


图2 研究区岩石磁化率频率分布直方图

(a)野外测量结果;(b)室内测量结果及磁化率分级点(黑色圆点).

Fig. 2 Histograms showing the distribution of frequency of bulk magnetic susceptibility of rocks in study area
(a)Result of field work; (b)Result of library and divide points of rock magnetism (black points).

表3 根据磁化率大小确定的岩石磁性分类

Table 3 Classification of rocks based on their magnetic susceptibility

李唐根(1987) ^[13]		R. U. Ubangoh(2005) ^[4]		本文		
岩石磁性	$\kappa(4\pi \times 10^{-6}$ SI)	岩石磁性	$\kappa(\times 10^{-6}$ SI)	岩石磁性	$\kappa(4\pi \times 10^{-6}$ SI)	样品数
逆磁性	<0			逆磁性	<0	12
无磁性	$0 \sim 100$	微弱磁性	<100	无磁性	$0 \sim 100$	59
弱磁性	$100 \sim 300$	弱磁性	$100 \sim 700$	弱磁性	$100 \sim 700$	41
中磁性	$300 \sim 700$	磁性	$700 \sim 1500$	中磁性	$700 \sim 5000$	76
强磁性	>700	强磁性	$1500 \sim 3000$	强磁性	$5000 \sim 20000$	33
		极强磁性	>3000	极强磁性	>20000	24

表 4 研究区岩石磁性类型及其矿物成分统计表

Table 4 Petromagnetic types and their mineral composition

岩石类型及其磁化率 ($\kappa/4\pi \times 10^{-6} \text{SI}$)	磁性	矿物成分(%)														样品数									
		逆磁性矿物				弱顺磁性矿物				强顺磁性矿物															
		石英	方解石	蛭石	斜长石	碱性强石	白云母	砂线石	绿帘石	其他	黑云母	角闪石	辉石	橄榄石	石榴石		绿泥石	磁铁矿	铁磁性矿物	铁质氧化物					
流纹岩 (2357~5153)	中强	58~80	0~1	0	20~40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	
流纹质凝灰岩 (1247~2357)	中	60~80	0	0	20~30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
英安岩 (41~125)	无-弱	50~65	0	0	15~30	20~30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
安山岩 (548~1136)	弱-中	0	0	0	30~70	15~30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0~1	5
安山质凝灰岩 (569)	弱	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
玄武岩 (33180~69867)	极强	0	0	0	60~80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
橄榄玄武岩 (1110~50207)	中-极强	0~5	0~10	0	40~70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	56
玄武质凝灰岩 (306~4943)	弱-中	0~5	0	0	5~15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
粒玄岩 (3775~72883)	中-极强	0	0~1	0	50~70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
硅质岩脉 花岗岩伟晶岩 (~15~7)	逆	0~100	0~1	0	0	60~80	0~20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
花岗斑岩、花岗岩 (10~3493)	无-中	10~90	0~5	0	0~10	30~90	0~5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
石英二长岩 (10~192)	无-弱	5~20	0	0~0.1	35~60	45~60	0~5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
黑云母石英 二长岩/花岗岩 (1096~32917)	中-极强	10~50	0~5	0.1~0.2	15~69	10~75	0~1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17
闪长岩 (192~17890)	弱-强	1~10	0~10	0~0.1	30~70	5~15	0~5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
中基性岩脉 (5916~41200)	强-极强	0~5	0~10	0	20~70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16

续表 4

岩石类型及其磁化率 ($k/4\pi \times 10^{-6} SI$)	矿物成分(%)														样品数				
	磁性				逆磁性矿物				弱顺磁性矿物				强顺磁性矿物				铁磁性矿物		
	石英	方解石	蛭石	石膏	斜长石	碱性长石	白云母	砂线石	绿帘石	其他	黑云母	角闪石	辉石	橄榄石		石榴石	绿泥石	磁铁矿	铁质氧化物
泥岩、粉砂岩 (23~305)	0~5	0	0~0.1	0	0	0	0	0	0	95~100 (泥质)	0	0	0	0	0	0	0	0	13
沉积岩类 含黑云母长石 砂岩(172~512)	10~30	0	0~0.1	30~50	0~10	0~5	0	0	10~40 (杂基)	5~10	0	0	0	0	0~5	0	0	0	4
复成分砾岩 (66~201)	60~90	0	0	0	10~20	0	0	0	10~20 (杂基)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
灰岩(-15~-8)	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
变质含黑云母 砂岩(163~423)	40~65	0	0~0.1	30~50	0~10	0~5	0~1	0~5	5~15 (杂基)	0~5	0	0	0	0	0	0	0	0	4
变质细砂岩 (25~52)	10~85	0	0~1	5~15	0~5	5~90	0~1	0~5	5~10 (杂基)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
千枚岩(50~281)	10~20	0	0~0.1	5~15	0	10~80	0	0	0	0~1	0	0	0	0	0	0	0	0	6
白云母片岩 (12~700)	8~60	0	0~0.1	0~20	0~10	20~85	0~0.1	0	0	0~10	0	0	0	0	0~5	0	0	0	16
变质岩类 石英英片岩(39~93)	60~70	0	0	20~30	0	8~20	0	0	0	0~2	0	0	0	0	0	0	0	0	3
含磁铁矿石 英片岩(8255)	89	0	0.1	0	8	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	2	0	1
黑云角闪片岩 (2617~19487)	20~30	0	0	10	5~10	0	0	0	0	20~30	20~40	0	0	0	0	0	0~5	0	2
白云母斜长片 麻岩(39~292)	30~50	0	0~0.1	10~25	0~15	10~60	0~0.1	0	0~1 (榴石)	0~1	0	0	0	0	1~5	0	0	0	16
黑云母片麻岩 (181~13681)	30~50	0	0~0.1	15~30	20~45	0~5	0	0	0~5 (绢云母)	1~5	0	0	0	0	0~5	0	0~5	0	8

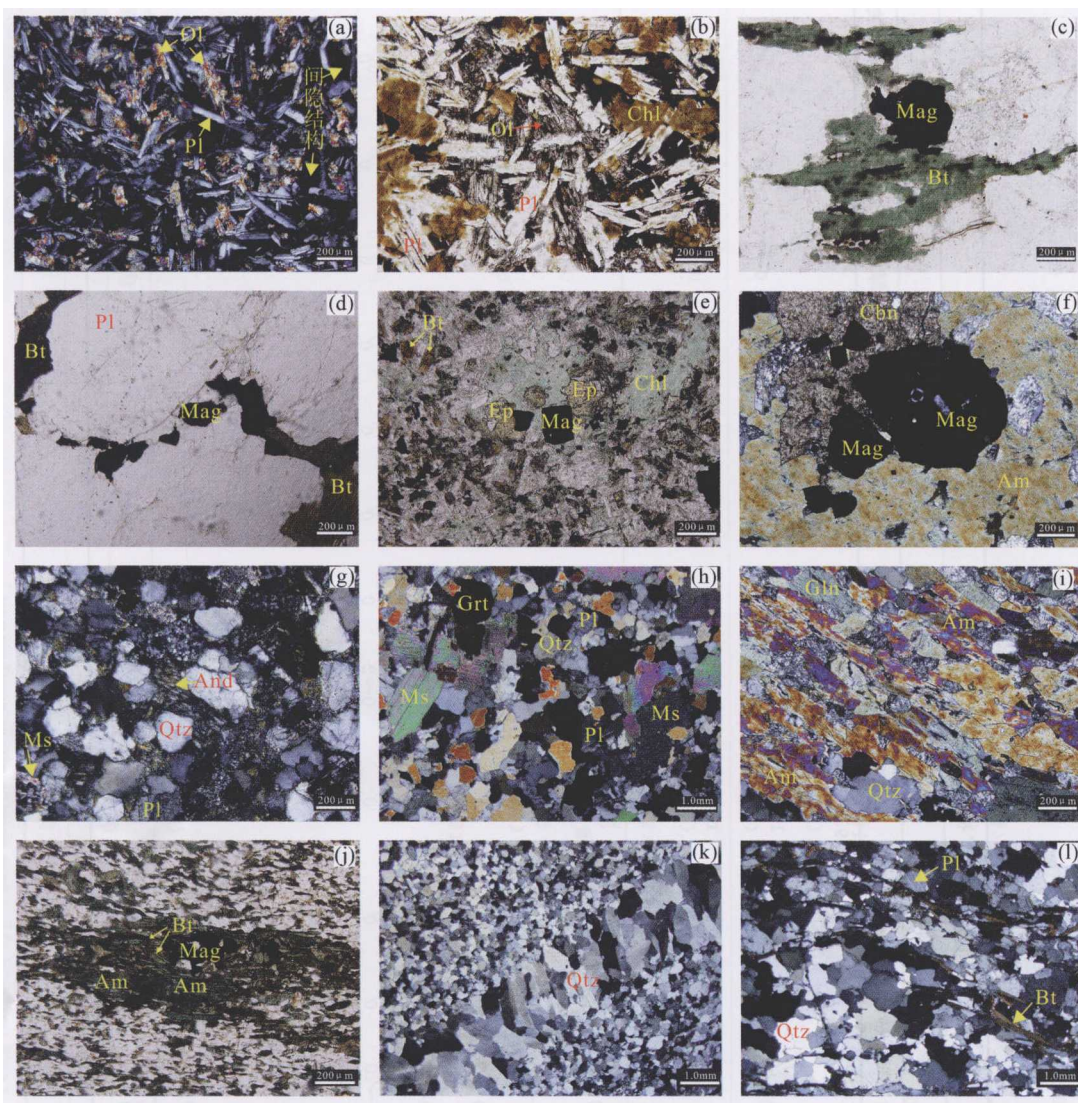


图3 各种磁性岩石的矿物组成显微照片图版(磁化率单位 $4\pi \times 10^{-6}$ SI)

(a) 橄榄玄武岩, $\kappa=2379$, 主要由斜长石、橄榄石组成; (b) 绿泥石化橄榄玄武岩, $\kappa=8032$, 由橄榄石、斜长石组成, 橄榄石蚀变为绿泥石, 并释放出铁质; (c) 碱长花岗岩, $\kappa=2825$, 由碱性长石、石英、斜长石、少量黑云母及磁铁矿组成; (d) 黑云母石英二长岩, $\kappa=7293$, 由斜长石、碱性长石、石英、黑云母、白云母及少量磁铁矿(约1%)组成; (e) 绿泥石化黑云母闪长玢岩, $\kappa=32700$, 由斜长石、角闪石、黑云母、绿泥石、绿帘石及少量磁铁矿组成(约4%); (f) 闪长岩, $\kappa=105467$, 由角闪石、斜长石、碱性长石及磁铁矿(约10%)组成; (g) 岩屑长石细砂岩, $\kappa=88$, 由石英、斜长石、少量白云母、少量安山岩岩屑、流纹岩岩屑组成; (h) 含石榴石白云母片麻岩, $\kappa=93$, 由石榴石、石英、白云母、斜长石组成; (i) 含石榴石角闪片岩, $\kappa=700$, 由石榴石、长石、角闪石组成; (j) 石英角闪黑云片岩, $\kappa=19487$, 由黑云母、角闪石、石英及少量磁铁矿(约1%)组成; (k) 石英岩, $\kappa=-15$, 全部由石英组成; (l) 黑云斜长片麻岩, $\kappa=181$, 由石英、斜长石、少量黑云母组成。(b, c~f, j) 为单偏光, (a, g~i, k, l) 为正交偏光。矿物代号: Mag-磁铁矿; Bt-黑云母; Am-角闪石; Ol-橄榄石; Chl-绿泥石; Ep-绿帘石; Ms-白云母; Qtz-石英; Pl-斜长石; Grt-石榴石; And-安山岩岩屑; Cbn-碳酸盐矿物。

Fig. 3 Photo plate Mineral composition and polarizing microscope pictures of magnetic rocks ($4\pi \times 10^{-6}$ SI of units is used)

(a) Olivine basalt, $\kappa=2379$, mainly consists of plagioclase and olivine; (b) Chloritized olivine basalt, $\kappa=8032$, made from olivine, plagioclase, altered olivine form chlorite and Fe; (c) Alkali-feldspar granite, $\kappa=2825$, main minerals: alkali-feldspar, quartz, plagioclase, biotite and magnetite; (d) Biotite quartz monzonite, $\kappa=7293$, main components: plagioclase, alkali-feldspar, quartz, biotite, muscovite and magnetite (about 1%); (e) Chloritized biotite diorite porphyrite, $\kappa=32700$, main minerals: plagioclase, amphibole, biotite, chlorite, epidote and magnetite (about 4%); (f) Diorite, $\kappa=105467$, main minerals: amphibole, plagioclase, alkali-feldspar, altered amphibole form carbonate and magnetite (about 10%); (g) Debris-feldspar, $\kappa=88$, main minerals: quartz, plagioclase, muscovite, andesite debris and rhyolite debris; (h) Muscovite gneiss contains garnet, $\kappa=93$, main minerals: garnet, quartz, muscovite and plagioclase; (i) Hornblende schist contains garnet, $\kappa=700$, main minerals: garnet, feldspar and amphibole; (j) Quartz-amphibole-biotite schist, $\kappa=19487$, main minerals: biotite, amphibole, quartz and magnetite (about 1%); (k) Quartzite, $\kappa=-15$, all quartz components; (l) Biotite plagioclase gneiss, $\kappa=181$, main minerals: quartz, plagioclase and some biotite. Photo plate (b, c~f, j) under single polarizer observed; Photo plate (a, g~i, k, l) under crossed polarizer observed. Mineral abbreviations: Mag-magnetite; Bt-biotite; Am-amphibole; Ol-olivine; Chl-chlorite; Ep-epidote; Ms-muscovite; Qtz-quartz; Pl-plagioclase; Grt-garnet; And-andesite debris; Cbn-carbonate.

以上,未见磁铁矿等铁磁性矿物,个别岩石发生绢云母化。

弱磁性岩石磁化率在 $150\sim 700(4\pi\times 10^{-6}\text{SI})$ 之间,岩石类型主要有含黑云母长石细砂岩、绿泥石化岩屑长石砂岩、含黑云母斜长片麻岩、含黑云母/角闪石正长花岗岩等。其矿物成分以斜长石和石英为主(岩屑分为长石、石英等组成矿物加以统计),二者总含量大于 90%;岩石中黑云母、角闪石的含量比无磁性岩石稍高(图 3(i,l)),约 5%左右,个别岩石发生绢云母化或绿泥石化。

中磁性岩石磁化率在 $741\sim 4790(4\pi\times 10^{-6}\text{SI})$ 之间,岩石类型主要有气孔杏仁含橄榄石玄武岩、玄武质凝灰岩、黑云母/角闪石石英正长岩等。其矿物成分以斜长石、黑云母、角闪石、橄榄石、辉石为主(图 3(a,c)),不含或含少量石英,含极少量的磁铁矿(图 3a)。强磁性岩石磁化率在 $5153\sim 19487(4\pi\times 10^{-6}\text{SI})$ 之间,岩石类型主要为橄榄玄武岩、黑云斜长片麻岩、黑云母花岗闪长岩、黑云母/角闪石花岗岩等。其矿物成分以斜长石、黑云母、角闪石、橄榄石、辉石为主(图 3(b,d)),少量磁铁矿(0.1%~3%,粒径 0.03 mm 左右)及铁质氧化物(约 5%)。

极强磁性岩石磁化率在 $20627\sim 105467(4\pi\times 10^{-6}\text{SI})$ 之间,岩石主要为含磁铁矿橄榄玄武岩、含磁铁矿闪长玢岩、闪长岩、角闪黑云片岩等。其矿物成分主要为斜长石、角闪石、辉石、橄榄石(图 3(e,f,j)),少量磁铁矿(1%~10%,粒径 0.03~0.1 mm 左右)及铁质氧化物(5%~20%)。

5 结论及讨论

5.1 火山岩类磁化率的矿物源

火山岩是岩浆喷出地表时快速凝固形成的,与相应成分的侵入岩比较,其结晶颗粒小,斑状结构发育。这一特点也决定了火山岩的磁化率较同成分的侵入岩低^[33]。本次研究中,火山岩磁化率主要为中磁性和强磁性,少量弱磁性和极强磁性。研究表明,火山岩的磁化率与其结构构造有密切的关系。

流纹岩的磁化率在 $1247\sim 5153(4\pi\times 10^{-6}\text{SI})$ 之间,变化范围较小,属中磁性岩石。其矿物成分主要为长英质矿物,含少量的黑云母,黑云母发生大面积的氧化,边缘及内部均分布有磁铁矿微粒。就结构构造而言,流纹岩样品具非细结构,斑晶不发育,为块状构造。由此可以认为,流纹岩的磁化率与其中铁磁性矿物的含量有密切关系。

玄武岩的磁化率变化范围在 $1112\sim 69867(4\pi\times 10^{-6}\text{SI})$ 之间,从中磁性到极强磁性均有分布。从结构构造方面,所研究的玄武岩斑状结构不发育(图 3(a,b)),多为间粒结构或间隐结构,气孔杏仁构造。研究表明,气孔的发育程度及充填状态对玄武岩的磁化率有一定的影响。表现在基质成分相同时,气孔中充填绿泥石的玄武岩比充填方解石、石英、沸石或无充填的玄武岩磁化率高;气孔大量发育的玄武岩比气孔不发育或少量发育的玄武岩磁化率低,这主要是气孔影响了岩石中磁性矿物的体积含量。从矿物成分而言,玄武岩主要由斜长石、橄榄石、辉石及少量铁镁质微粒矿物组成。值得一提的是,研究区发育大量橄榄玄武岩,且橄榄石含量通常占到岩石体积的 20%以上。橄榄石本身就可使玄武岩的磁化率升高,另一方面,玄武岩中橄榄石的伊丁石化(蛇纹石化)、绿泥石化及橄榄石与辉石的反应边结构,都会使橄榄石释放出铁质氧化物,使得玄武岩的磁化率进一步升高,进而达到极强磁性。因此,玄武岩的磁化率主要来源于橄榄石、辉石、磁铁矿和含铁矿物蚀变分解的铁质集合体,而占大量体积的斜长石贡献较小。

5.2 侵入岩类磁化率的矿物源

岩浆岩磁化率的变化范围很广,从 $10\sim 105467(4\pi\times 10^{-6}\text{SI})$ 。前人研究认为,这种大的范围主要是由岩石中铁磁性矿物的含量变化引起的^[34]。本次研究采集了侵入岩(包括浅成侵入岩)样品 72 块,岩石的磁性分布示于图 4。

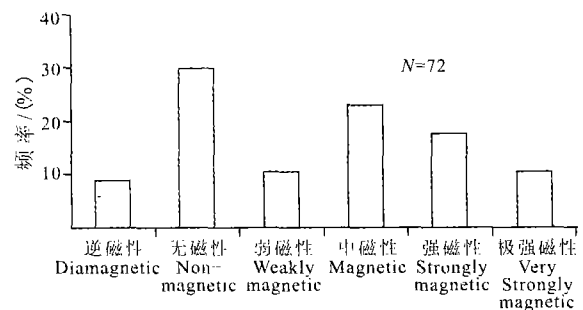


图 4 研究区侵入岩磁性分布直方图

Fig. 4 Distribution of magnetism of intrusive rocks in study area

由图 4 可以看出,侵入岩样品以无磁性和中磁性为主。各磁性岩石组成具体为:逆磁性岩石为硅质岩脉和花岗质伟晶岩脉;无磁性岩石包括石英二长岩、石英正长岩、富石英花岗岩、花岗斑岩;弱磁性岩石主要为二长花岗岩,中磁性岩石为二云母石英正长岩、含黑云母花岗斑岩、含黑云母/角闪石正长岩

岗岩;强磁性岩石包括黑云母石英闪长岩、黑云母角闪石花岗岩;极强磁性岩石主要为磁铁矿闪长岩、磁铁矿闪长玢岩、辉绿玢岩等.由此可以看出,侵入岩的磁性大小表现为:磁铁矿闪长岩/闪长玢岩>黑云母/角闪石花岗岩>含黑云母/角闪石花岗岩>花岗岩.从各磁级岩石矿物成分看,这种磁化率差异就是岩石中黑云母、角闪石(辉石)以及铁磁性矿物含量变化的反应.硅质岩脉或伟晶岩脉的矿物成分单一,矿物纯度高,鲜含杂质,因此显示逆磁性.石英二长岩、花岗斑岩等岩石,矿物成分以长石、石英等弱顺磁性矿物为主,含极少量的黑云母、角闪石(小于1%),极少见不透明的铁磁性矿物,因此岩石磁化率值低;其次,随着岩石中黑云母、角闪石等强顺磁性矿物含量的增加,岩石的磁化率也开始增加,此时,铁镁硅酸盐矿物就是岩石磁化率的主要贡献者.当磁铁矿含量增加到一定量时,即使岩石中不含黑云母等强顺磁性矿物,岩石也属于强磁性-极强磁性的.另外,当岩石中的黑云母或角闪石发生氧化或蚀变释放出铁质(图3f),其磁化率也会增大,这时,铁磁性矿物及含铁硅酸盐矿物一起构成了岩石的强磁化率.

本文选取45个新鲜无蚀变的侵入岩样本,进行多元线性回归分析.选择侵入岩中的主要常见矿物——石英、斜长石、碱性长石、黑云母、角闪石及磁铁矿作为自变量,拟合函数形式为:

$$\kappa_r = a_1 C_q \kappa_q + a_2 C_f \kappa_f + a_3 C_a \kappa_a + a_4 C_b \kappa_b + a_5 C_{am} \kappa_{am} + a_6 C_m \kappa_m, \quad (1)$$

其中, κ_r 为岩石磁化率值, C_i 、 κ_i 依次为石英(q, $\kappa = -1.3$) (磁化率单位为 $4\pi \times 10^{-6}$ SI,下同)、斜长石(f, $\kappa = 0.01$)、碱性长石(a, $\kappa = 0.01$)、黑云母(b, $\kappa = 100$)、角闪石(am, $\kappa = 80$)、磁铁矿(m, $\kappa = 100000$)的体积百分含量和磁化率值, a_i ($i = 1, 2, \dots, 6$)为各变量的系数.

(1)式中 C 是岩矿鉴定所得到的各种矿物的体积含量,矿物的磁化率值亦为给定的值,两者均为已知数.这样,据式(1)建立起求解 a_i ($i = 1, 2, \dots, 6$)的方程组,应用最小二乘估计,求得各项系数 a_i ,并带入(1)式,得出如下关系式:

$$\kappa_r = -5.68 \times 10^2 C_q + 2.86 \times 10^2 C_f + 3.28 \times 10^2 C_a + 1.18 \times 10^4 C_b + 1.27 \times 10^4 C_{am} + 5.35 \times 10^5 C_m. \quad (2)$$

为了检验(2)式是否有意义,必须对其进行有效性检验.应用 F 统计量检验回归方程的显著性.经SPSS软件计算得出观测值 $F_0 = 348.25$ (显著性水平选为95%),查 F 分布表得临界值 $F_\alpha = 2.54$, $F_0 <$

F_α ,说明(2)式的线性关系是显著的.然后对回归系数进行 t 分布显著性检验,经SPSS计算结果可知, C_m (磁铁矿)、 C_{am} (角闪石)、 C_b (黑云母)三项通过显著性检验, C_q (石英)、 C_f (斜长石)、 C_a (碱性长石)没有通过显著性检验.说明前三者与 κ_r 显著线性相关,而后三者与 κ_r 线性相关不显著.

由(2)式计算的结果与实测值具有良好的符合关系(图5),进一步说明侵入岩岩石磁化率与单矿物磁化率之间存在线性关系(各项系数反映相应矿物对岩石磁化率贡献的大小),从而也证明了侵入岩磁化率的矿物源主要是铁磁性矿物(体积百分含量前的系数权重值很高)、黑云母及角闪石.

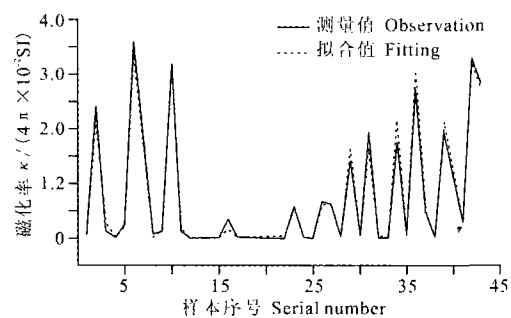


图5 侵入岩多元线性回归分析结果与实际值对比
Fig. 5 Contrast between multiple linear regression analysis result and real value of intrusive rocks

从岩石磁化率与其组成矿物的磁化率之间的关系可以看出,磁性体总磁化率是构成该磁性体各个部分的磁化率累加的结果.由此推测,地质体的总磁化率与构成地质体各个岩石的磁化率-体积含量之间也应存在类似关系.我们进行磁异常解释,实际上所涉及的是具有一定规模的地质体.本研究结果暗示,有两点在磁异常解译应加以注意,一是总体磁化率与个体磁化率可能为线性累加关系;二是小体积的强磁性体可能是影响大的地质体磁性的主导因素.

5.3 沉积岩类磁化率的矿物源

沉积岩在形成过程中,母岩物质经过了风化、剥蚀和搬运,使得其中的暗色矿物难以保存下来,而斜长石、石英等抗风化颗粒得以大量保存.但碎屑颗粒也可能包含了来自母岩的含铁矿物,这些含铁矿物通常为磁铁矿、赤铁矿及铁的氢氧化物,以赤铁矿为主^[35],含量一般低于1%.对沉积岩中这些磁性载体类型及粒度大小的研究,有着重要的应用价值^[36~39].

本次研究中经过显微镜鉴定,沉积岩样品中并未发现铁磁性物质.泥岩、粉砂质泥岩、石英砂岩等以泥质、粘土矿物、石英为主的沉积岩,磁化率在 $25 \sim 93 (4\pi \times 10^{-6} \text{ SI})$ 之间,岩石的磁化率由粘土矿物等

提供,为无磁性岩石.长石石英砂岩(硅质胶结、泥质胶结)、岩屑长石砂岩(泥质胶结)的磁化率要明显高于泥岩类,磁化率变化在 $112 \sim 512 (4\pi \times 10^{-6} \text{ SI})$, 属弱磁性岩石.研究表明,含黑云母长石石英砂岩、绢云母化长石砂岩及绿泥石化粉砂质泥岩的磁化率要明显高于其他沉积岩.这说明即便是少量的黑云母、绿泥石等强顺磁性矿物对沉积岩磁化率的贡献也是显著性的.

5.4 变质岩类磁化率的矿物源

由表 1 可以看出,变质岩的磁化率值有很大的变化范围,从 $12 \sim 11712 (4\pi \times 10^{-6} \text{ SI})$, 这跟其原岩成分有关,也受到变质岩变质程度的影响^[19].以沉积岩为原岩的副变质岩(包括千枚岩、白云母片岩、石英片岩等)磁性通常较弱,而以火成岩为原岩的正变质岩(包括黑云角闪片岩和黑云斜长片麻岩等,原岩为火山岩^[40,41])磁化率通常较高.前人资料显示^[19],磁化率很弱的变质岩与造岩矿物的成分有关,而磁化率在 $100 \sim 10000 (4\pi \times 10^{-6} \text{ SI})$ 的岩石则与铁磁性成分成比例.本次研究中,无磁性、弱磁性岩石中未见铁磁性矿物,绢云母、白云母、黑云母、角闪石(表 4)是组成岩石的主要顺磁性矿物,岩石类型主要为白云母片岩.中磁性的变质岩中黑云母、角闪石的含量明显增加,甚至可占岩石体积的 60% (如 NH32 号,黑云角闪片岩,磁化率值为 $2617 \times 4\pi \times 10^{-6} \text{ SI}$, 磁铁矿的含量小于 1%). 强磁性或极强磁性的岩石不仅铁磁性矿物的含量有所增加,强顺磁性的黑云母等矿物也大量发育,如 NH33 号(图 3j),岩性为石英角闪黑云片岩,矿物成分为碱性长石(4%)、黑云母(35%)、角闪石(25%)、石英(40%)、磁铁矿(5%). 由此可知,无-弱磁性变质岩石的磁化率主要由组成岩石的铁镁硅酸盐矿物(如角闪石、绿泥石和黑云母)贡献,因为他们的原始结晶形态比磁铁矿的原始结晶尺寸大^[42],而且它们在岩石中的含量远比磁铁矿丰富,但后期黑云母、角闪石蚀变释放出游离的铁而形成磁铁矿等铁磁性矿物时,岩石的磁化率就主要由铁磁性矿物决定.

采用与侵入岩相同的方法进行拟合,选取自变量为石英($q, \kappa = -1.3$)、斜长石($f, \kappa = 0.01$)、碱性长石($a, \kappa = 0.01$)、白云母($ms, \kappa = 10$)、石榴石($g, \kappa = 200$)、角闪石($am, \kappa = 60$)、黑云母($b, \kappa = 80$)、磁铁矿($m, \kappa = 100000$),得出如下拟合关系式:

$$\begin{aligned} \kappa_i = & -6.47 \times 10^2 C_q + 1.01 \times 10^2 C_f + 1.42 \times 10^2 C_a \\ & + 6.66 \times 10^2 C_{ms} + 9.72 \times 10^3 C_g + 8.09 \times 10^3 C_b \\ & + 3.10 \times 10^3 C_{am} + 2.75 \times 10^5 C_m, \quad (3) \end{aligned}$$

(3)式的显著性检验结果 $F_0 = 2.56 < F_\alpha = 181.73$, (3)式的线性关系显著成立. t 分布回归系数显著性结果为石榴石、黑云母、角闪石、磁铁矿通过检验,其余未通过检验.拟合值与实际测量值的对比示于图 6. 同样地,式(3)及显著性检验结果也证明了变质岩磁化率的矿物源主要是黑云母、角闪石、磁铁矿,石榴石对变质岩磁化率的贡献与黑云母、角闪石相当.

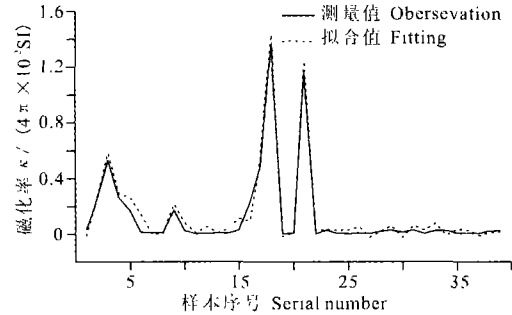


图 6 变质岩多元线性回归拟合结果与实际值对比
Fig. 6 Contrast between multiple linear regression analysis result and real value of metamorphic rocks

5.5 矿物次生变化对岩石磁化率的影响

矿物的次生蚀变作用往往会使其磁化率发生显著性变化,且随着蚀变类型和强度的不同而不同,被蚀变矿物类型和新生矿物种类都会影响其磁化率^[43].表 2 给出了矿物的常见蚀变特征及对矿物磁化率的影响.

不含铁造岩矿物主要为逆磁性和弱顺磁性矿物(常见为石英、长石和部分粘土矿物),蚀变后不释放出铁质.这类矿物蚀变前后磁化率的变化率主要取决于蚀变前后反应物(被蚀变矿物)与产物(新生矿物)的磁化率比值和蚀变程度(新生矿物量).二者磁化率差别越大、新生矿物量越高,磁化率变化越大;否则,蚀变前后无显著性变化.例如,长石(磁化率 $-1.3 \sim 1.7$ 或 < 0.01)的绢云母($4 \sim 20$) $\times 4\pi \times 10^{-6} \text{ SI}$ 化会使磁化率升高,而碳酸盐(磁化率多 < 0)化则会使磁化率降低.

铁镁造岩矿物(常见为黑云母、角闪石、橄榄石等),本身具有较高的磁化率,经次生蚀变常释放出铁质^[29].本次研究表明,中酸性火成岩中的黑云母在发生绿泥石化或转变为白云母时,会释放出铁质矿物(图 3(c, d, j));角闪石蚀变为绿泥石、绿帘石、黑云母(图 3e)、碳酸盐矿物(图 3f).这些蚀变因形成铁的氧化物而使岩石的磁化率升高.有文献报道^[44],当岩石遭受长期的氧化作用和表生作用,使得磁铁矿和钛磁铁矿变为弱铁磁性(赤铁矿和其他),且磁性颗粒也变小,此时岩石磁化率就减小;机

械风化作用会使铁磁性矿物部分带出也能导致岩石磁化率降低。

致谢 杨慧心教授、肖锋老师的指导使作者受益匪浅,在此表示真诚的谢意,一并感谢张俊峰、赵刚在磁化率测量过程中给予的大力支持!

参考文献(References)

- [1] Borradaile G J. 磁化率、岩组与应变:回顾. 刘正宏译. 世界地质, 1990, 4: 146~161
Borradaile G J. Magnetic susceptibility, petrofabric and strain: a retrospection. Translated by Liu Z H, *Global Geology* (in Chinese), 1990, 4: 146~161
- [2] 张世红, 潘和平, 骆森等. 中国大陆科学钻探主孔 100~2000 m 测井磁化率和磁三量分析. 现代地质, 2005, 19(4): 608~614
Zhang S H, Pan H P, Luo M, et al. Analysis on magnetic susceptibility and magnetic thicomponent data from well logging in the main hole(100~2000 m) of CCSD. *Geoscience* (in Chinese), 2005, 19(4): 608~614
- [3] Hounslow M W, Morton A C. Evaluation of sediment provenance using magnetic mineral inclusions in clastic silicates: comparison with heavy mineral analysis. *Sedimentary Geology*, 2004, 171: 13~36
- [4] Ubangoh R U, Pacca I G, Nyobe J B, et al. Petro-magnetic characteristics of Cameroon Line volcanic rocks. *Journal of Volcanology of Cameroon Research*, 2005, 142: 225~241
- [5] Diana J, Neli J, Bernard H, et al. Changes in mean magnetic susceptibility and its anisotropy of rock samples as a result of alternating field demagnetization. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 255: 390~401
- [6] 刘光鼎. 中国海区及邻域地质地球物理特征. 北京: 科学出版社, 1992
Liu G D. Geological and Geophysical Characteristics of China Offshore and Regional Areas (in Chinese). Beijing: Science Press, 1992
- [7] 刘光鼎主编. 中国海区及邻域地质地球物理系列图(1: 500 万). 北京: 地质出版社, 1992
Liu G D ed. The Geological and Geophysical Map of the China's Seas and Adjacent Areas(1: 5000000) (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1992
- [8] 地质矿产部第二海洋地质调查大队主编. 南海地质地球物理图集(1: 200 万). 广州: 广东省地图出版社, 1987
Geological and Geophysical Atlas of South China Sea (in Chinese). Guangzhou: Guangdong Atlas Publishing House. 1987
- [9] 陈洁, 温宁. 南海地球物理图集. 北京: 科学出版社, 2010
Chen J, Wen N. Geophysical Atlas of South China Sea (in Chinese). Beijing: Sciences Press. 2010
- [10] 郝天珧, 黄松, 徐亚等. 南海东北部及邻区深部结构的综合地球物理研究. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1785~1796
Hao T Y, Huang S, Xu Y, et al. Comprehensive geophysical research on the deep structure of Northeastern South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(6): 1785~1796
- [11] 郝天珧, 徐亚, 赵百民等. 南海磁性基底分布特征的地球物理研究. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2763~2774
Hao T Y, Xu Y, Zhao B M, et al. Geophysical research on distribution features of magnetic basements in the South China Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(11): 2763~2774
- [12] 陈洁, 高德章, 温宁等. 南海磁场特征研究. 地球物理学进展, 2010, 25(2): 376~388
Chen J, Gao D Z, Wen N, et al. Characteristics of the geomagnetic field in the South China Sea. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2010, 25(2): 376~388
- [13] 李唐根. 南海北部沿海陆地及岛屿岩石密度、磁性的测定和研究. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7(3): 57~69
Li T G. Determination and study of density and magnetism of rocks of the coast and the islands of the northern South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 1987, 7(3): 57~69
- [14] 姜枚, 贾秀敏. 南岭花岗岩岩石物理性质的研究. 中国地质科学院矿床地质研究所所刊. 1989, 1: 145~154
Jiang M, Jia X M. Physical properties of granite rocks in Nanling region. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits Chinese Academy of Geological Sciences* (in Chinese), 1989, 1: 145~154
- [15] 金庆焕. 南海地质与油气资源. 北京: 地质出版社, 1989
Jin Q H. Geology and hydrocarbon resources of the South China Sea (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1989
- [16] 吴汉宁. 岩石的磁性组构及其在岩石变形分析中的应用. 岩石学报, 1988, 1: 94~98
Wu H N. Magnetic fabric and its application to strain analysis. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 1988, 1: 94~98
- [17] Phippe R, Catherine K, Dominique F L, et al. Magnetic mineralogy and metamorphic zonation in the Ardennes Massif (France-Belgium). *Tectophysics*, 1997, 271: 231~248
- [18] Ali A, Eric C F, Zafer A. The magnetic susceptibility of granitic rocks as a proxy for geochemical composition: example from the Saruhan granitoids, NE Turkey. *Tectophysics*, 2007, 441: 85~95
- [19] [苏]H. B. 多尔特曼. 岩石和矿物的物理性质. 蒋宏耀译, 北京: 科学出版社, 1985
HOPTMAN H B. Physical Properties of Rocks and Minerals (in Chinese). Translated by Jiang H Y. Beijing: Science Press, 1985
- [20] 李色篆, 蒲绍东, 张益民等. 岩石磁性研究方法及其应用. 北京: 冶金工业出版社, 1988
Li S Z, Pu S D, Zhang Y M, et al. Reserch method and its implication of rocks and minerals magnetisim (in Chinese). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1988
- [21] Dunlop D J, Ozdemir O. Rock Magnetism: Fundamentals and Frontiers. Cambridge: Cambridge University Press, 1997
- [22] Hunt C P, Moskowitz B M, Banerjee S K. Magnetic properties of rocks and minerals. In: Ahrens T J, Editor. Handbook of Physical Constants, Am. Geophys. Union. 1994
- [23] 李英堂, 田淑艳, 汪美凤. 应用矿物学. 北京: 科学出版社, 1995

- Li Y T, Tian S Y, Jiang M F. Implication of Mineralogy (in Chinese). Beijing: Science Press, 1995
- [24] Clark D A. Magnetic petrophysics and magnetic petrology: aids to geological interpretation of magnetic surveys. *Journal of Australian Geology & Geophysics*, 1997, 17(2): 83~103
- [25] 刘青松, 邓成龙. 磁化率及其环境意义. *地球物理学报*, 2009, 52(4): 1041~1048
- Liu Q S, Deng C L. Magnetic susceptibility and its environmental significances. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(4): 1041~1048
- [26] 地球科学大辞典编委会. 地球科学大辞典. 北京: 地质出版社, 2006
- Editorial Board of (Dictionary of Earth Sciences). Dictionary of Earth Sciences (in Chinese), Beijing: Geological Publishing House, 2006
- [27] 李 勇, 李海燕, 刘 慧. 石英砂与石英砂原料磁化率的对比及其意义. *非金属矿*, 2009, 32(4): 56~58
- Li Y, Li H Y, Liu H. Contrast of magnetic susceptibility of silica sand and silica raw material and its significance. *Non-Metallic Mines* (in Chinese), 2009, 32(4): 56~58
- [28] 王 濮, 潘兆楹, 翁玲宝等. 系统矿物学(中册). 北京: 地质出版社, 1982
- Wang P, Pan Z L, Weng L B, et al. Systematic Mineralogy (Mid Volume) (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1982
- [29] 常丽华, 陈曼云, 金 巍等. 透明矿物薄片鉴定手册. 北京: 地质出版社, 2006
- Chang L H, Chen M Y, Jin W. et al. Handbook of Identification of Transparent Minerals (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2006
- [30] 徐海军, 金振民, 耿新功. 磁化率和密度对中国大陆科学钻探主孔 100~2000 m 岩石类型的判别. *地球科学——中国地质大学学报*, 2006, 31(4): 513~519
- Xu H J, Jin Z M, Ou X G. Lithology determination of rocks from CCSD 100--2000m main hole by magnetic susceptibility and density use discriminant function analysis. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 2006, 31(4): 513~519
- [31] 田莉丽, 邓成龙. 岩石的磁学性质. *地球物理学进展*, 2001, 16(2): 109~117
- Tian L L, Deng C L. A brief introduction to rock magnetism. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2001, 16(2): 109~117
- [32] 郭武林. 岩石磁性研究及其地质意义. *桂林冶金地质学院学报*, 1985, 5(3): 279~286
- Guo W L. Review of the study and geological significance on rock magnetism. *Journal of GuiLin College of Geology* (in Chinese), 1985, 5(3): 279~286
- [33] 郭友钊, 林天亮. 岩石磁学在岩浆岩岩石学研究中的应用. *国外地质勘探技术*, 1994, 4: 1~10
- Guo Y Z, Lin T L. Implication of rock magnetism in igneous rock. *Foreign Geoexploration Technology* (in Chinese), 1994, 4: 1~10
- [34] Benn K, Rochette P, Bouchez J L. et al. Magnetic susceptibility, magnetic mineralogy and magnetic fabrics in a late Archean granitoid-gneiss belt. *Precambrian Research*, 1993, 63: 59~81
- [35] 孙知明, 胡守云, 马醒华. 现代湖泊沉积物中磁性矿物的研究及其环境意义. *地球物理学报*, 1996, 39(2): 178~187
- Su Z M, Hu S Y, Ma X H. A rock-magnetic study of recent lake sediments and its palaeoenvironmental implication. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1996, 39(2): 178~187
- [36] 敖 红. 三门峡盆地晚新生代沉积物磁性载体类型. *地球物理学报*, 2001, 44(4): 520~527
- Ao H. Type of magnetic carriers in late Cenozoic sediments in Sanmenxia basin, Northerncentral China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, 44(4): 520~527
- [37] 韩玉林, 谈晓冬, 陈 忠等. 湖光岩玛珉湖表层沉积物磁性粒度特征及其来源. *科学通报*, 2010, 55(3): 261~267
- Han Y L, Tan X D, Chen Z, et al. Magnetic granulometry of recent sediments from the Huguang Maar and its implication for provenience. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2010, 55(3): 261~267
- [38] 卢升高, 白世强. 杭州城区土壤的磁性及磁性矿物学及其环境意义. *地球物理学报*, 2008, 51(3): 762~769
- Lu S G, Bai S Q. Magnetic characterization and magnetic mineralogy of the Hangzhou urban soils and its environmental implications. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(3): 762~769
- [39] 杨小强, 李华梅. 泥河湾盆地沉积物粒度组分与磁化率变化相关性研究. *沉积学报*, 2002, 20(4): 675~679
- Yang X Q, Li H M. The correlation between the content of the difference grain size and magnetic susceptibility in lacustrine sediments, Nihewan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica* (in Chinese), 2002, 20(4): 675~679
- [40] 马大铨, 黄香定, 陈哲培等. 海南岛结晶基底—抱板群层序及时代. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997
- Ma D Q, Huang X D, Chen Z P, et al. Crystalline Basement of Hainan Island—Sequence and Ear of Baoban Group (in Chinese). Wuhan: China University of Geoscience Press, 1997
- [41] 福建省地质矿产局. 福建省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 2008
- Geological Mineral Office Fujian Province. Lithostratigraphy of Fujian Province (in Chinese). Wuhan: China University of Geoscience Press, 2008
- [42] Brradaile G, Keeler W, Alford C, et al. Anisotropy of magnetic susceptibility of some metamorphic minerals. *Physics of The Earth and Planetary Interiors*, 1987, 48: 161~166
- [43] 姜 枚, 吴良士, 马开义. 中国一些区域岩石物理性质研究. *中国地质科学院矿床地质研究所所刊*, 1982, 1: 101~114
- Jiang M, Wu L S, Ma K Y. Reserch on rock physical properties in some areas of China. *Bulletin of the Institute of Mineral Deposits Chinese Academy of Geological Sciences* (in Chinese), 1982, 1: 101~114
- [44] Gregorova D, Frantisek, Kohut M. Magnetic susceptibility and geochemistry of Variscan West Carpathian granites: implications for tectonic setting. *Physics and Chemistry of Earth*, 2003, 28: 729~734